

Marek POKORNÝ¹, Bjarne Paulsen HUSTED²

POROVNÁNÍ TEPLOTNÍHO POLE MODELU ŠACHTY S PLYNOVÝM HOŘÁKEM A MATEMATICKÉHO CFD MODELU

COMPARISON OF TEMPERATURE FIELD FOR SHAFT MODEL INCLUDING GAS BURNER AND MATHEMATICAL CFD MODEL

Abstrakt

Článek se zabývá porovnáním první série naměřených dat v laboratorním modelu šachty s výsledky získanými matematickým modelováním. Model průběžné prázdné šachty s nehořlavým opláštěním v první variantě bez vnitřního požárního zatížení je konstruovaný v polovičním měřítku a odpovídá svým průřezem bytové šachtě a výškou přibližně jednomu a půl násobku výšky podlaží. Situace je modelována softwarem FDS („Fire Dynamics Simulator“) využívající principy dynamického proudění tekutin (CFD).

Klíčová slova: šachtový model, CFD, FDS simulace, teplotní pole

Abstract

The paper deals with comparison of the first series of measured data in a lab shaft model with results gained by mathematical modelling. The model of a continuous empty shaft with non-combustible (inert) covering for the first variant is constructed in the half scale and it corresponds by its cross section dimensions to a flat shaft and the height for one and half floor approximately. This situation is modelled by the software FDS („Fire Dynamics Simulator“) using principles of computational fluid dynamics (CFD).

Key words: shaft model, CFD, FDS simulation, temperature field

Úvod

Praxe a výzkum v oblasti požárního inženýrství využívá díky stále výkonnější a dostupnější výpočetní technice stále více matematické modelování. Zónové požární modely jsou dnes zcela běžnou projekční pomůckou. Modely typu pole označované rovněž jako modely dynamického proudění tekutin (CFD - „Computational Fluid Dynamics“) jsou pro praktické aplikace využívány méně často a své uplatnění nachází spíše v oblasti výzkumu.

CFD modely pokrývají celou řadu simulací, kde zónové modely svou aplikací nemohou postačit, kladou však vysoký požadavek na hardware a výpočet tak může být velice zdoluhavý (hodiny, dny, týdny). Zadávaní vstupních dat bývá uživatelsky značně náročné a o přesnosti výpočtu a náročnosti výpočtu též výrazně rozhoduje i jemnost (hrubost) sítě. Čím jemnější síť tím přesnější, ale také náročnější výpočty jsou.

¹ Ing., České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice, e-mail: marek.pokorny.1@fsv.cvut.cz

² Ph.D., Stord/Haugesund University College, Department of Engineering, Haugesund, Bjørnsonsgate 45, Norway

Pro požární simulace prostorů s jedním převládajícím rozměrem (šachty, tunely) jsou obecně zónové modely nevhodné, a to především z důvodu odchylného předpokladu chování sloupce kouře a horkých plynů („fire plume“) ve srovnání s prostorem, kde žádný z rozměrů výrazně nepřevládá (např. místnost). V případě šachet je přísávání vzduchu do „fire plume“ a jeho celkové chování výrazně ovlivněno blízkými stěnami.

Zdůvodnění experimentu

Experiment je součástí disertační práce autora a vznikl v rámci doktorské studijní stáže v Norsku a pokračující spolupráce mezi katedrami autorů. Záměrem jsou dvě fáze experimentu, kde první fáze je rozložena do tří variant:

Fáze 1 = průběžná šachta

- varianta 1 = šachta s nehořlavým opláštěním,
- varianta 2 a 3 = šachta s náhradním požárním zatížením,

Fáze 2 = členěná šachta, tj. model simulující požár v šachtě s vnitřní přepážkou v úrovni stropu.

V první fázi experimentu má první varianta **ověřit míru schopnosti CFD modelu predikce sledovaných parametrů od plynového propanového hořáku v úzkém a vysokém prostoru**, jakými šachty běžně jsou. Jedná se o rozložení teplotního pole, rychlosti proudění v přírodním tunelu a v šachtě a tepelný tok v ose zadní části šachtové stěny (obrázky 2 a 3). Druhá a třetí varianta experimentu (v současné době připravováno) bude mít dále za úkol **ověřit schopnost simulace procesu hoření náhradního požárního zatížení**, které představuje ve skutečnosti hořlavý obsah šachty v podobě technických instalací dnes nejčastěji v podobě plastických hmot. Členěná šachta (naměřená data jsou analyzována) má pak **ověřit zvláštnosti v chování vrstvy kouře pod a nad stropní přepážkou**.

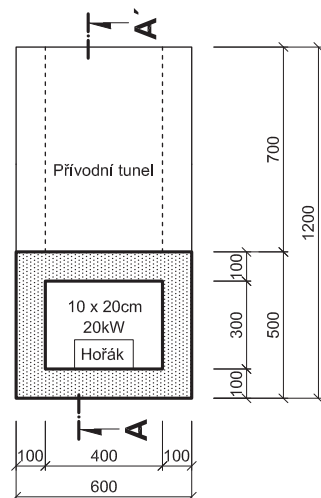
Dále v článku je pozornost věnována variantě 1 a rozložení teplotního pole.

Laboratorní model

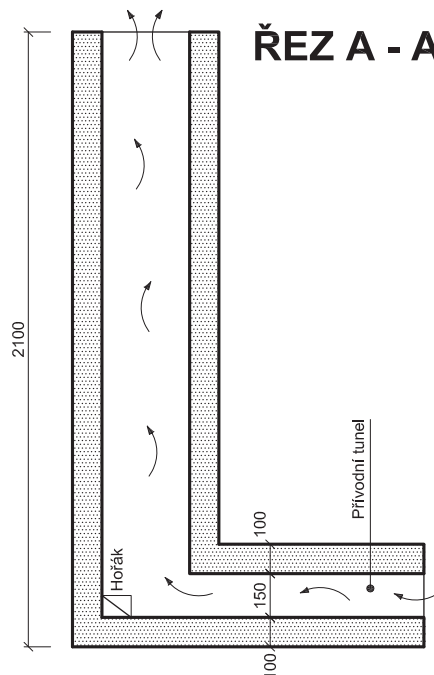
Půdorysná geometrie modelu šachty vychází z rozměrů běžné bytové instalační šachty a její výška odpovídá přibližně výšce jednoho a půl patra (obr. 1). Celá situace je vzhledem k laboratorním podmínkám provedena v polovičním měřítku ve stejném měřítku je i počítačově modelována.

Model šachty pro fázi 1 a pro variantu 1, tj. průběžná šachta s nehořlavým opláštěním, je vytvořen z pórobetonových tvárnic 600 x 400 x 100 mm kladených nasucho. Přívod vzduchu do spodní části šachty zajišťuje přírodní tunel, jehož funkce je ustálení proudění vzduchu, tj. eliminace výraznějších turbulencí u vstupu do šachty. Na dně šachty v kontaktu s přední stěnou šachty je umístěn plynový propanový hořák o půdorysných rozměrech 10 x 20 cm a výšce 7,5 cm s tepelným výkonem 20 kW, který zajistí výšku plamene pohybující se ve spodní polovině šachty. Tento výkon hořáku je použit i pro fázi experimentu 2, tj. pro členěnou šachtu. Pro variantu 2 a 3 bude výkon hořáku výrazně nižší, jelikož bude sloužit pouze jako zdroj zapálení.

PŮDORYS



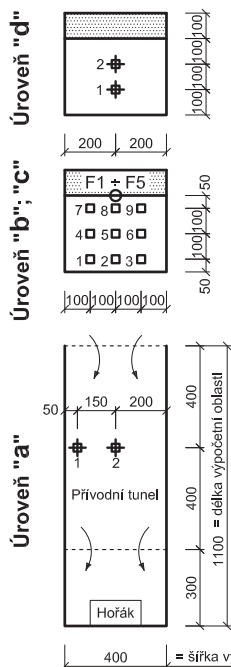
ŘEZ A - A'



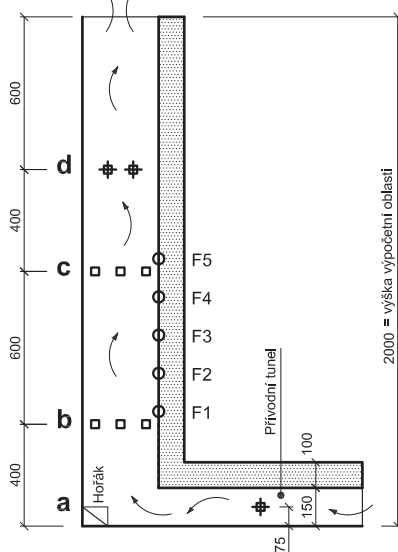
Obrázek 1: model průběžné nehořlavé šachty (fáze 1 - varianta 1)

Rozmístění měřících zařízení

PŮDORYSY



ŘEZ



- tepelný tok (označení F = Flux meter)
- teplota (označení T = Termocouple)
- + rychlost proudění (označení V = Velocity meter)

Obrázek 2: schéma rozmístění a označení měřících zařízení

V šachtě jsou měřeny teploty, rychlosti proudění a celkový tepelný tok. Teploty jsou měřeny termočlánky umístěnými především ve dvou skupinách po devíti ve výšce 0,4 m a 1 m nad dnem šachty. Další termočlánky společně se zařízením na měření rychlosti proudění jsou umístěné ve střední části vstupního tunelu a ve vrchní části šachty ve výšce 1,4 m nad dnem šachty. Celkový dopadající tepelný tok (konvekční + radiační složka) je měřena v ose zadní části šachty, a to v pěti různých bodech. Každé zařízení je dále

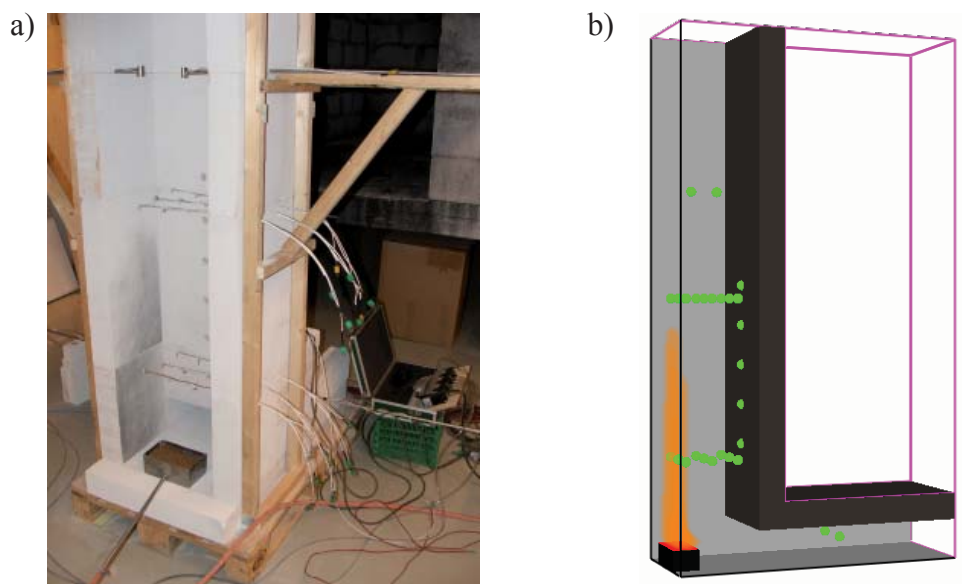
zejména v grafech označeno dle schématu na obrázek 2. Například ve zkratce T_b_2 (lab) označuje „T“ teplotu (termočlánek) ve výškové úrovni „b“ v půdorysné pozici „2“.

„(lab)“ pak označuje teplotu naměřenou při laboratorním experimentu, eventuálně označení „(fds)“ hodnoty získané z počítačové simulace v softwaru FDS.

Délka laboratorního měření byla v tomto případě 30 min. Čas vycházel s intervalu měření tepelného toku v měřících bodech F1 až F5. K dispozici bylo jedno měřící zařízení, u kterého bylo nutné měnit jeho polohu v průběhu experimentu. Interval mezi výměnou polohy 4 min. + 1 min. pro výměnu.

FDS simulace

Jako matematický model byl využit software Fire Dynamics Simulator (FDS - verze 5.4.3) řešící algoritmy dynamického proudění tekutin (CFD). Tento software řeší Navier-Stokesovy rovnice pro nestacionární transport s důrazem na přenos tepla a kouře využívá pro prezentaci výsledků samostatný software Smokeview (použita verze 5.4.8), který je schopný zobrazit například pohyb kouře, šíření ohně, rozložení teplotního pole a pole rychlostního proudění, tlakové poměry, vektory teplot a rychlosti proudění, a to ve 2D a 3D konturách (izoplochy) nebo ve formě videozáznamu (videosekvence). Simulace je možné provést v režimech přímé numerické simulace DNS (Direct Numerical Simulation) nebo standardní simulace velkých vírů LED (Large Eddy Simulation), která byla jako standardní ponechána.



Obrázek 3: rozmístění měřících zařízení v šachtě a v přívodním tunelu
(a) laboratorní model (bez čelní stěny); (b) modelovaná situace
v programu FDS

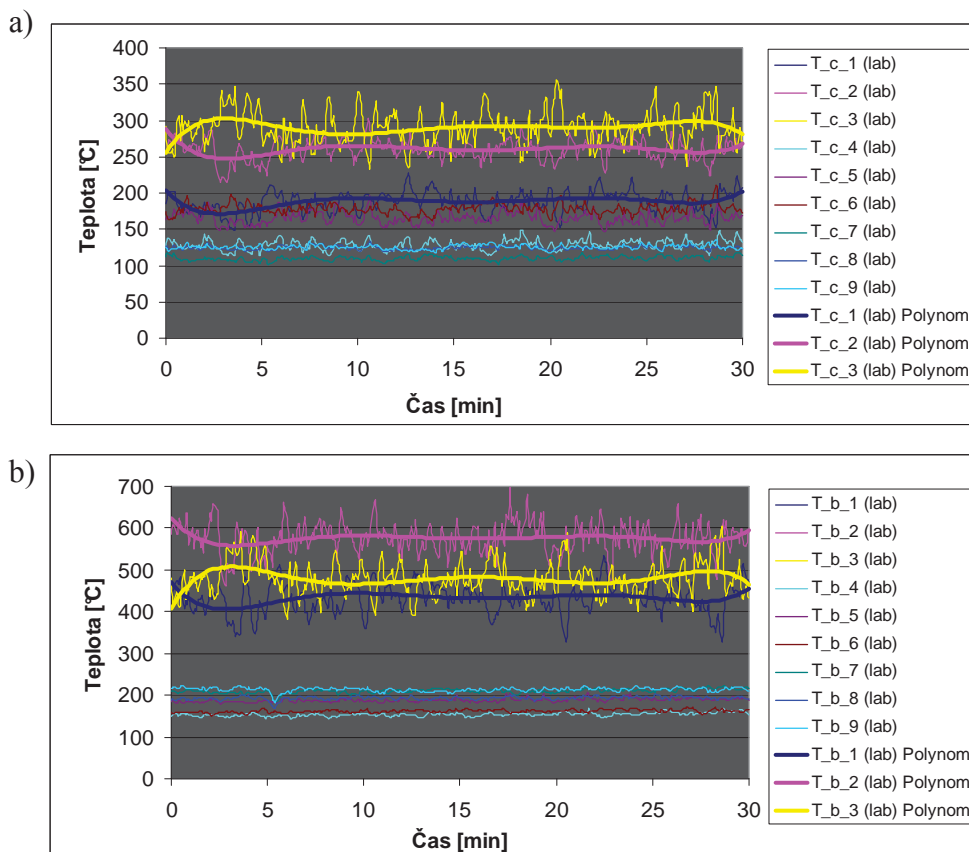
Pro model šachty a přívodní tunel byla navržena jedna výpočetní oblast, kterou pokrývá síť s kontrolními objemy (buňkami) o velikosti 25 x 25 x 25 mm, tj. celkem 56.320 kontrolních objemů. **Volba jemnosti sítě byla zvolena na základě doporučeného poměru charakteristického požárního průměru D^* a velikosti buňky dx pohybujícím se mezi hodnotami 4 až 16 [1].** Čím vyšší daný poměr je, tím je CFD analýza citlivější, přesnější a samozřejmě déle trvající. Pro zvolenou síť a výkon hořáku 20 kW je možné dopočítat hodnotu poměru následovně:

$$\frac{D^*}{dx} = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5}}{dx} = \frac{\left(\frac{20}{1,204 \cdot 1,005 \cdot 293 \cdot \sqrt{9,81}} \right)^{2/5}}{0,025} = \frac{0,201}{0,025} = 8,0$$

Pro simulaci v délce 300 s = 5 min. byl využit počítač s osmi jádrovým procesorem s frekvencí každého jádra 2,93 GHz a celkovou kapacitou paměti 11,7 GB. Doba výpočtu pro danou konfiguraci modelované situace byla 166.118 s = 2.768 min. = 46 hodin = 1,92 dne. Je třeba podotknout, že hořící prostor je v této variantě zcela inertní, tj. žádný materiál kromě spalovaného plynu (propanu) se nepodílí na hoření, což výrazně zkracuje dobu simulace, která je na poměrně výkonném počítači již tak značná.

Analýza teplotního pole z laboratorního experimentu

Některé průběh teplot (zejména pak u FDS simulací) mají v čase výrazně kolísavý (oscilující) charakter. Pro snazší orientaci je v grafech vybranými průběhy proložena středními hodnotami polynomická křivka.

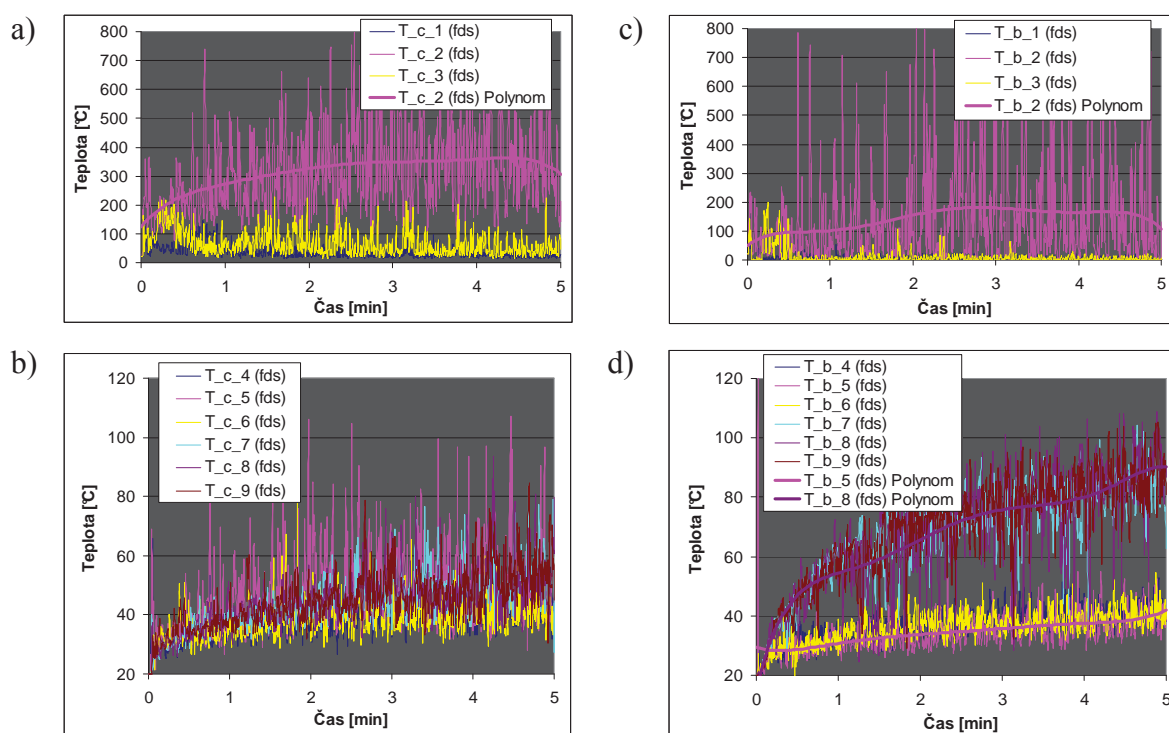


Obrázek 4: laboratorní experiment - teploty zaznamenané termočlánky v šachtě
(a) v úrovni „c“ (výška 1 m); (b) v úrovni „b“ (výška 0,4 m)

V porovnání s horní skupinou jsou v dolní skupině laboratorních termočlánků (úroveň „b“ ve výšce 0,4 m) patrné výrazně vyšší teploty, a to zejména u termočlánků přiléhajících k čelní šachtové stěně nad hořákem. Nejvyšší teplota okolo 600 °C měřená prostředním termočlánkem postupně k okraji šachty klesá na hodnotu mezi 400 a 500 °C (obrázek 4 (b)). Levý termočlánek (b_3) udává o něco vyšší teploty než pravý (b_1). Prostřední a zadní řada termočlánků (b_4 až b_9) pak udávají podobné teploty pohybující se kolem 200 °C.

V horní skupině laboratorních termočlánků (úroveň „c“ ve výšce 1 m) jsou pak teploty celkově nižší. Zajímavostí je náklon teplotního pole po celou dobu 30ti minutového experimentu na pravou stranu šachty. Termočlánek c_3 během celé doby udává teploty vyšší (okolo 300 °C) než prostřední termočlánek c_2 (okolo 250 °C). Na opačné levé straně šachty jsou teploty měřené termočlánkem c_1 až o 100 °C nižší (obrázek 4 (a)).

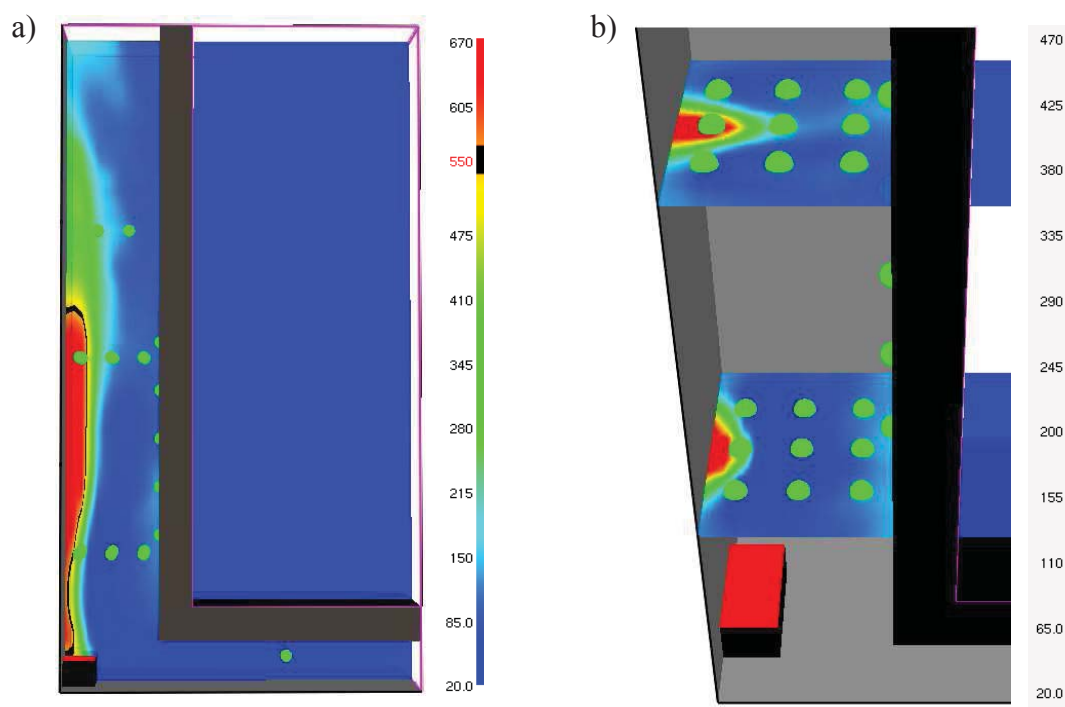
Analýza teplotního pole z FDS simulace



Obrázek 5: FDS simulace - teploty zaznamenané v šachtě termočlánky

(a) „c_1 až c_3“ (výška 1 m); (b) „c_4 až c_9“ (výška 1 m);
(c) „b_1 až b_3“ (výška 0,4 m); (d) „b_4 až b_9“ (výška 0,4 m)

Pokud srovnáme FDS výstupy mezi dolní a horní skupinou termočlánků, je možné sledovat **zajímavý jev, a to zejména u termočlánků nad plynovým hořákem (obrázek 5 (a) a (c) - termočlánky b_2 a c_2), které udávají zcela opačný charakter, než bylo naměřeno v laboratorním testu.** Teplota na termočlánku b_2 blíže hořáku je výrazně nižší teplota než na termočlánku c_2 o 60 cm výše. V tomto případě **je vhodné analyzovat nejen bodové měření teplot, ale současně pro objasnění využít barevných izoploch (obrázek 6).** Zde je jednoznačně patrný nejprve náklon teplotního pole k čelní šachtové stěně až nad první skupinou termočlánků (úroveň „b“) je možné vidět naopak zpětný odklon teplotního pole zpět do šachty, což vysvětluje možná zprvu nelogický průběh teplot v grafech. Je však na místě podotknout, že **podobný jev se za celou dobu laboratorního experimentu nekonal.**



Obrázek 6: FDS simulace - rozložení teplotního pole v šachtě
(v čase 4 min. 26 s)

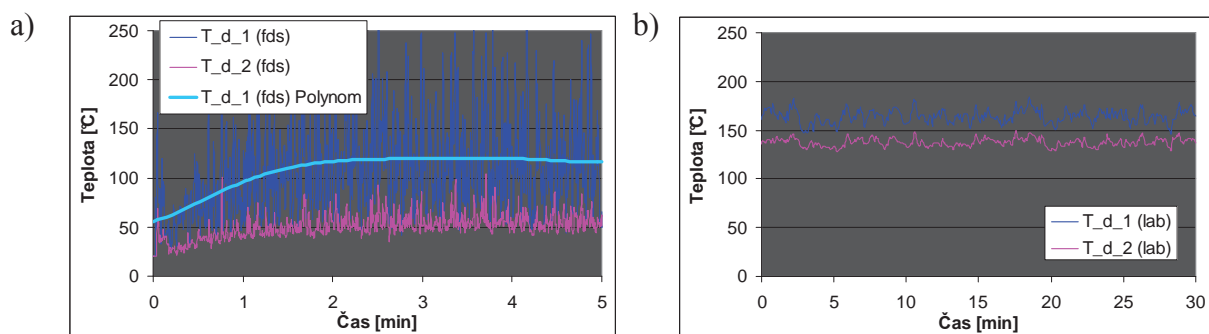
(a) ve svislé rovině vedené v ose šachty; (b) ve vodorovné rovině v úrovni „b“ (výška 0,4 m) a v úrovni „c“ (výška 1 m)

Další neměnnou zvláštnost v čase simulace je možné pozorovat na průbězích teplot na dolní skupině termočlánků obrázek 5 (d), tj. na úrovni „b“ (výška 0,4 m nad dnem šachty). Termočlánky na příčné středové ose šachty (b_4, b_5, b_6) jsou blíže hořáku avšak indukují systematicky výrazně nižší teploty, než termočlánky u zadní šachtové stěny (b_7, b_8, b_9) dále od hořáku. Středové termočlánky předpovídají teploty jen okolo 40 °C, zatímco zadní termočlánky více jak dvojnásobně vyšší. Tento jev „teplejšího“ proudění u zadní šachtové stěny je patrný i na izoplochách na obr. 6 (a) i (b), kde modrá barva se světlejším odstínem předpovídá teplejší oblast.

Analýza teplot na nejvýše umístěných termočláncích

V předchozích kapitolách byly analyzovány výsledky zvláště pro laboratorní experiment a zvláště výsledky z FDS simulace. **Na obrázku 7 můžeme v grafech sledovat jisté podhodnocení simulované teploty proti hodnotám naměřeným v laboratoři.** Podobný trend je patrný i na předchozích grafech. Například maximální naměřená teplota se pohybuje okolo 600 °C (obrázek 4 (b)), kdežto FDS simulace předpokládá na polynomicke křivce necelých 400 °C (obrázek 5 (a)).

Na obrázek 7 je patrné, že termočlánek blíže k čelní šachtové stěně nad hořákem (d_1) v obou případech ukazuje vyšší teplotu než u termočláunku blíže zadní stěně (d_2). Na příkladu termočláunku d_1 je nejvyšší teplota u FDS simulace cca 120 °C a naměřená teplota cca 165 °C, což udává míru podhodnocení FDS simulace téměř 30 %. V případě termočláunku d_2 (FDS 60 °C, naměřeno 140 °C) je podhodnocení vyšší (přes 50 %).



Obrázek 7: Průběh teplot v šachtě v úrovni „d“ (výška 1,4 m)
(a) FDS simulace; (b) laboratorní experiment

Závěr

Hodnocené výsledky se týkají pouze rozložení teplotního pole pro model průběžné nehořlavé šachty, kde je možné vyvodit závěr, že v daném šachtovém modelu použitý software FDS systematicky podhodnocuje rozložení teplotního pole ve srovnání s naměřenými daty.

Pro daný model průběžné šachty jsou v současné době analyzovány rychlosti proudění a tepelný tok dopadající na zadní šachtovou stěnu. V dalších dvou variantách se pokoušíme porovnat schopnost FDS softwaru simulovat proces hoření náhradního požárního zatížení, které se běžně vykytuje v šachtách v podobě hořlavých technických instalací (potrubí, kabely).

Model nehořlavé průběžné šachty byl rovněž upraven do podoby horizontálně členěné šachty, který napodobuje prostor po výšce členěný přepážkami např. v úrovni požárních stropů. Vliv této stropní přepážky na chování kouřové vrstvy pod pohyblivou přepážkou (různé procento otevření) a přeskok plamene nad přepážku byl rovněž odzkoušen a bude předmětem podrobnější analýzy.

Tento článek vznikl za finanční podpory organizace Research Council of Norway a vědecké podpory spoluautorů na Stord Haugesundské univerzitě v Norsku.

Seznam literatury

- [1] McGrattan K., Klein B., Hostikka S., Floyd J.: *Fire Dynamics Simulator* (Version 5). User's Guide. NIST Special Publication 1019-5. USA, National Institute for Standards and Technology in cooperation with VTT Technical Research Centre of Finland. 10/2009.
- [2] Burísková P., Angelist J., Dvořák O.: Odhad teplotního pole při simulaci požáru osobního automobilu v tunelu. In *Požární ochrana*. Sborník příspěvků z mezinárodní konference. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, VŠB - TU Ostrava, FBI, 2008. s. 70-75. ISBN: 978-80-7385-040-1.
- [3] Galaj J., Zowada J.: Analysis of the influence of fire source location on temperature distribution in the compartment. In *Požární ochrana*. Sborník příspěvků z mezinárodní konference. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, VŠB - TU Ostrava, FBI, 2008. s. 70-75. ISBN: 978-80-7385-040-1.